



Le geste canal de communication homme/machine: la communication "instrumentale"

Claude Cadoz

► To cite this version:

Claude Cadoz. Le geste canal de communication homme/machine: la communication "instrumentale". Revue des Sciences et Technologies de l'Information - Série TSI: Technique et Science Informatiques, 1994, 13 (1), pp.31-61. hal-00867517

HAL Id: hal-00867517

<https://hal.science/hal-00867517>

Submitted on 17 Oct 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le geste canal de communication homme/machine la communication « instrumentale »

Claude Cadoz

*ACROE (Association pour la création et la recherche sur les outils d'expression)
ministère de la Culture et de la Francophonie
LIFIA (Laboratoire d'informatique fondamentale et d'intelligence artificielle)
(unité de recherche associée au CNRS, IMAG)
46 av. Felix Viallet
38000 Grenoble*

RÉSUMÉ. *Le développement de la communication homme/machine en tant que problématique de l'informatique est récent. Dans cette problématique, si la plupart des modalités de la communication humaine ont déjà été exploitées, le canal gestuel, pourtant porteur de nombreuses potentialités, est resté en retrait. Nous présentons ici les propriétés communicationnelles du canal gestuel et montrons comment il peut intervenir dans la communication homme/machine. Nous introduisons un concept nouveau et essentiel : la Communication instrumentale, inspiré de la relation communicationnelle établie entre un instrumentiste musicien et son instrument. Généralisée à des tâches autres que le contrôle de phénomènes sonores, la communication instrumentale avec l'ordinateur complète le schéma triangulaire des modes d'interaction homme/machine/environnement.*

ABSTRACT. *The development of Man/Machine communication as an issue in computer science is recent. Within this issue, most of the human communication modalities have been exploited. However, the gestural channel, yet rich, has remained aside. We present the communicational properties of the gestural channel and show how it can play a role in Man/Machine communication. We introduce a new and essential concept : the Instrumental Communication inspired by the communicational relationship between the instrumentalist musician and his instrument. Generalized to tasks other than the control of sound phenomena, the instrumental communication with the computer completes the triangular diagram of Man/Machine/Environment interaction modes.*

MOTS-CLÉS : *communication homme/machine, canal gestuel, fonction ergotique, interface de communication gestuelle, communication instrumentale.*

KEY WORDS : *man-machine communication, gestural channel, ergotic function, gestural communication interface, instrumental communication.*

1. Introduction

Le fantasme anthropomorphique à propos des machines est présent dès les origines de l'ordinateur. Cependant, curieusement, si les pionniers comme von Neumann lui-même, dès la mise en œuvre des premières machines automatiques à programmation vers 1943-45, n'ont pas hésité à parler de "cerveaux artificiels", ce n'est que beaucoup plus tard, vers la fin des années 60 que le terme de *communication homme/machine* faisant implicitement de la machine l'égal de l'homme a commencé à circuler.

Au début, la machine n'est pas spécialement communicative ; le premier *calculateur universel contrôlé par un programme*, le Z3 de l'Allemand Zuse, construit en 1941 reçoit ses données avec un lecteur de bandes et l'opérateur dispose d'une console. Pour le calculateur à relais binaires BTL Model 1, construit en 1939 aux Bell Labs par les Américains Stibitz et Williams, un télétype transformé servait à introduire les problèmes et à lire les résultats. Pour programmer l'ENIAC (17468 tubes à vide, 6000 commutateurs manuels), la machine qui inaugure l'ère des ordinateurs, il fallait tourner à la main des milliers de commutateurs et brancher spécialement des centaines de câbles.

Une première étape significative en matière de communication est celle du développement des *langages* de programmation. Le FORTRAN, mis au point par Backus de 1953 à 1956, est le premier *langage de communication avec la machine* qui ne soit pas un langage machine et qui se veut plus proche du langage naturel. En fait, pendant ces années et jusque vers la fin des années 70, la notion de communication avec l'ordinateur se définit exclusivement autour de celle de langage de programmation évolué. La communication est envisagée sous un aspect essentiellement *linguistique*, relativement abstrait et ignorant de ses modalités physiques et sensorielles. Les organes matériels de cette communication, s'ils évoluent dans leurs performances, sont stables dans leur fonction ; il s'agit pendant très longtemps des dispositifs qui avaient déjà cours dans les années 50 : claviers alphanumériques, consoles de visualisation, crayons optiques, imprimantes.

Au début des années 70 cependant, on s'intéressait à la parole comme mode de communication : parler à l'ordinateur pour le commander et entendre sa réponse par le même mode. C'est un domaine de recherche en soi qui s'est alors développé : la *communication parlée*, avec l'analyse et la synthèse vocale, la reconnaissance et la reconstruction de la parole... Dans le même temps, la synthèse d'image par ordinateur et l'infographie ont effectué un parcours important dont l'un des aboutissements est la performance de *réalisme* des images de synthèse actuelles. De nombreux travaux dans des domaines et pour des applications très divers : télémanipulation et commande de robots, imagerie médicale, ergonomie des postes de pilotage, des stations de contrôle de systèmes et chaînes de processus complexes, bureautique, etc., se sont développés de la même manière, sans liens systématiques les uns avec les autres, et sans se réclamer explicitement de la communication homme/machine.

Le phénomène qui a provoqué alors une véritable sensibilisation à la *communication homme/machine*, et qui, par là même a donné un sens au terme est probablement la mini révolution provoquée par l'arrivée du MacIntosh. Brillante vedette des PC, il apporte, avec la souris, les icônes et les fenêtres, des concepts nouveaux et instantanément convaincants (issus de travaux menés antérieurement dans les laboratoires de Xerox) et tout un mode de manipulation de représentations métaphoriques évoquant des manipulations d'objets naturels. La communication homme/machine est devenue un thème de recherche. Elle fait appel à de nombreux domaines : l'analyse et la synthèse de la parole, la phonétique, la linguistique, la psychologie perceptive et cognitive, l'image et sa synthèse, la reconnaissance de forme et la vision artificielle, les techniques et théories de l'interfaçage graphique etc. Le summum est la communication homme/machine multi-modale qui envisage la question non seulement comme une mise à niveau des modes communicationnels imposés par la machine aux modes proprement humains mais aussi comme une articulation, à l'instar de la communication naturelle, de toutes les modalités humaines disponibles.

Dans la perspective d'humaniser la relation entre l'homme et l'ordinateur, on a donc battu le rappel d'un certain nombre de disciplines y compris du domaine des sciences humaines et on s'est attaché aux caractéristiques objectives de chacun des *canaux de communication*, quantifiant leurs performances et modélisant leurs fonctions. On dispose aujourd'hui de connaissances précises sur le fonctionnement de l'oreille et les stratégies de la perception acoustique, l'organe vocal et son contrôle moteur, la vision, les relations intermodales. Symétriquement, côté machine, on a perfectionné les *interfaces* : interfaces vocales capables de saisir un certain ensemble de mots prononcés oralement, de synthétiser des paroles intelligibles, interfaces de vision artificielle capables d'analyser certains comportements ou certaines scènes, interfaces de visualisation capables de présenter des scènes complètes dans des espaces virtuels tridimensionnels.

Mais dans toute cette évolution, l'exploitation du geste est restée primitive. Au début il sert à manipuler les interrupteurs, contacteurs, rotateurs, curseurs, puis il se normalise et s'installe dans le confort et l'universalité sage du clavier alpha-numérique ; et entre ce dernier et le développement anarchique d'une pléthore de sticks, boules, manettes et autres syntaxeurs, il n'y a aucune théorie de la communication gestuelle. Alors que le vocal et le visuel mobilisent des contingents de chercheurs depuis une bonne vingtaine d'années, il a fallu attendre la malicieuse invasion des *souris* et la tapageuse intrusion du *gant de données*, il y a quelques années à peine, pour pouvoir commencer à parler officiellement du *geste*.

Et pourtant, le canal gestuel est peut-être le plus singulier et le plus riche des canaux de communication...

C'est à sa réhabilitation en quelque sorte, et à la mise en évidence du rôle essentiel qu'il peut jouer dans la communication homme/machine, que s'attache cet article. L'objectif n'est pas de donner des recettes techniques ni d'expliquer comment construire des interfaces gestuelles mais plutôt, afin de pouvoir poser des bases pour

la communication gestuelle, d'ouvrir des horizons, de susciter une réflexion, à la limite d'ordre épistémologique. On va tout d'abord tenter de faire valoir la richesse du canal gestuel et la diversité de ses possibilités indépendamment de toute relation à l'ordinateur. On abordera ensuite les conditions matérielles de sa mise en œuvre dans l'interaction avec l'ordinateur en s'appuyant sur des considérations techniques puis en décrivant une sélection de situations types exploitant différemment ses potentialités. Des éléments techniques et conceptuels issus des travaux de l'équipe que dirige l'auteur (l'ACROE), en particulier sur les transducteurs gestuels rétroactifs (TGR), seront introduits pour montrer jusqu'où l'on peut envisager l'utilisation du canal gestuel dans la relation de l'homme à l'ordinateur. On présentera à ce titre les concepts de "communication instrumentale" et d'"interface de communication instrumentale" (I.C.I.) indissociables de la technique des TGR.

2. Le Canal Gestuel

Une particularité du canal gestuel, qui le distingue d'emblée des autres canaux, est qu'il est moyen d'action sur le monde physique et moyen de communication informationnelle. Dans cette dernière fonction il est à double sens, c'est-à-dire moyen d'émission et moyen de réception d'informations. Yvette Hatwell, du Laboratoire de psychologie expérimentale de Grenoble, explique :

" Les contraintes qui pèsent sur la vision et le toucher sont très différentes. Efficace et rapide (...), inoffensive et discrète (elle ne modifie pas les objets sur lesquels elle se porte), la vision est considérée comme une modalité noble dont l'usage est très encouragé à des fins de connaissance ou à des fins esthétiques (les musées n'exposent que des choses "à voir").

Au contraire, des interdits sévères pèsent sur le toucher. Ils viennent d'abord de l'implication directe des sensibilités cutanées et mécaniques dans les fonctions sexuelles et la vie érotique, elles-mêmes réprimées. D'autre part, contrairement à la vision, le toucher n'est pas simplement "contemplatif" ; il peut transformer l'état de la source qui le stimule..." [HAT 86].

Dans cette remarque, Yvette Hatwell ne fait référence qu'à l'une des fonctions du canal gestuel, celle qui correspond au sens tactile. Mais même pour ce seul sens les choses apparaissent d'emblée avec leur richesse : c'est-à-dire en particulier avec l'impossibilité de dissocier action et perception. Les systèmes perceptifs sont tous des systèmes perceptivo-moteurs mais la motricité mise en œuvre dans le toucher est très différente de celle mise en œuvre dans la vision (mouvement des yeux) car la main est l'organe privilégié d'exécution des actions pratiques instrumentales sur le monde. *"La main est une structure complexe dont la fonction perceptive est imbriquée à une fonction motrice (...): celle d'instrument de travail grâce auquel sont réalisés la saisie, le transport et la transformation des objets à des fins utilitaires."* (Hatwell, *op. cit.*).

Associées à la main, on peut considérer trois fonctions différentes mais complémentaires et imbriquées : une fonction d'action matérielle, modification, transformation de l'environnement, que nous appellerons ici *ergotique*, une fonction *épistémique*, c'est-à-dire de connaissance de l'environnement et enfin une fonction *sémiotique*, c'est-à-dire d'émission d'information à destination de l'environnement. Chacune de ces trois fonctions prise séparément fait intervenir à des degrés variables chacune des deux autres.

2.1. La main organe de perception : la fonction épistémique du geste

La première fonction sensorielle de la main à laquelle on pense est donc le *toucher*. En fait, le sens du toucher implique beaucoup plus que la main, il implique toute l'enveloppe corporelle ainsi que les couches musculaires profondes. La densité des récepteurs n'est cependant pas la même partout, elle est très importante sur la face interne des doigts, en particulier sur la dernière phalange, sorte de fovea tactile, où le pouvoir séparateur est de 2,3 mm, contre 42 mm par exemple sur le dos (Hatwell, *op. cit.*). C'est ce qui explique pour partie la fonction prédominante de la main dans le sens tactile.

Mais on s'arrête en général à cette forme élémentaire du toucher, qui nous renseigne tout au plus sur la température ou l'état de surface des objets. Or cette forme, la *perception tactile cutanée simple* est minimale. La main est l'organe d'un sens beaucoup plus élaboré : le sens *tactilo-proprio-kinesthésique*.

— Tactilo-kinesthésique (on dit aussi haptique) : par la combinaison de stratégies de palpations, de mouvements exploratoires et de l'évolution des informations envoyées par les différentes cellules sensibles de la peau, des muscles et des jointures, on acquiert, par la perception tactilo-kinesthésique, des informations de forme, orientation, distance, grandeur des objets. Sous certaines conditions de proximité, la perception tactilo-kinesthésique associant activité motrice et perception cutanée simple permet d'accéder aux mêmes aspects spatiaux que l'oeil.

— Proprioceptif : des récepteurs sensibles dans les articulations, conjointement aux récepteurs vestibulaires (de l'oreille interne) permettent de percevoir le poids, les trajectoires, les mouvements des objets que nous manipulons.

Le sens tactilo-proprio-kinesthésique donne en fait des informations relatives à la température, la pression, l'état de surface d'un objet, sa dureté, sa mollesse, sa forme, son orientation, sa distance et sa taille, son poids, ses structures articulaires, ses propriétés de plasticité ou de déformabilité et enfin ses mouvements.

2.2. La main organe d'action : la fonction ergotique du geste

De la même façon que la perception tactilo-proprio-kinesthésique engage en réalité le corps dans son entier, la main qui agit, transforme, transporte, n'est que l'extrémité du système moteur complet qu'est le corps humain, avec sa charpente

articulée et son ensemble de muscles. Dans une étude récente sur la "dynamique du jongleur", Peter Jan Beek [BEE 89] montre que le système de la motricité humaine, qui gère quelques 792 muscles, 110 articulations et 100 degrés de liberté est pour le moins un *système complexe*. Ce système est capable d'assembler un grand nombre de muscles/articulations en unités fonctionnelles, ces unités peuvent être constituées de diverses manières pour la même fonction et ces processus d'assemblage sont stables et reproductibles. Mais ce qui caractérise l'action motrice, la main en train de travailler, c'est qu'elle est en prise directe avec la matière, qu'elle peut la modeler, la transporter, l'usiner, la briser... Elle lui communique non pas de l'information, mais de l'énergie, elle applique des forces, des déformations et des déplacements aux objets et ces derniers lui résistent de diverses manières, lui renvoyant parfois une part de cette énergie.

2.3. La main organe d'expression : la fonction sémiotique du geste

Il s'agit cette fois des comportements gestuels qui ont pour fonction de faire connaître : les gestes qui produisent un message informationnel à destination de l'environnement. Par les quelques exemples de situations expressives que l'on va évoquer rapidement ci-après, on va tout d'abord simplement montrer, à travers leur diversité, la richesse du canal gestuel dans cette fonction.

Dans le geste qui accompagne la parole, il y a une sémiotique naturelle et spontanée. Contrairement à ce que l'on croit habituellement ce type de geste n'est pas seulement un ajout à la parole destiné à exprimer des états affectifs ou à "colorer" l'articulation verbale. Il apparaît que les gestes partagent avec la parole certaines étapes de traitement et que, en conséquence, ils font partie de la même structure communicative ou expressive [McNE 85], [FEY 87], [McNE 87]. Cette gestique est donc un mode d'expression à part entière. Elle peut faire l'objet d'une étude en soi pour mettre en évidence sinon un langage, au moins une typologie comme celle proposée par Ekman et Friesen [EKM 72] qui distinguent :

- les *bâtons* : mouvements qui accentuent ou donnent de l'importance à un mot particulier ou une phrase ;
- les *idéographes* : mouvements qui esquissent le chemin ou la direction de la pensée ;
- les mouvements *déictiques* : qui indiquent un objet, un lieu ou un événement ;
- les mouvements *spatiaux* : qui décrivent une relation spatiale ;
- les mouvements *rythmiques* : qui décrivent le rythme ou le repos d'un événement ;
- les *kinétographes* : mouvements qui décrivent une action du corps ou quelque action non humaine ;
- les *pictographes* : qui dessinent une figure ou la forme du référent ;
- et les mouvements *emblématiques* qui sont des ensembles utilisés pour illustrer un propos verbal, répétant ou se substituant à un mot ou une phrase.

La *langue des signes*, utilisée par les sourds-muets, a probablement quelques liens avec le mode d'expression précédent, mais évidemment il ne s'agit plus d'accompagner, mais de remplacer la parole. Dans cette fonction, le geste apparaît comme extrêmement performant et si on y retrouve des correspondances avec la parole à des niveaux aussi fondamentaux que ceux de la double articulation ou de la spécialisation fonctionnelle en éléments correspondant au verbe, au substantif, etc. les structures et les systèmes de la langue des signes sont, sur d'autres aspects, très différents de ceux de la langue parlée. Par ailleurs, la langue des signes, ou plutôt les langues des signes, présentent cette particularité remarquable de comporter des universaux communs à toutes les cultures [CUX 85].

La *gestique du chef d'orchestre*, qui s'adresse elle aussi à la vision (l'audition étant mobilisée pour une autre tâche) a également une fonction sémantique [FAN 88]. Elle inclut une symbolique avec ses règles et ses idiomatismes. Cette symbolique doit être à même d'exprimer la sémantique musicale et d'ouvrir le dialogue avec les musiciens. La gestique du chef d'orchestre s'appuie sur certaines bases permanentes, mais elle est créée aussi à partir d'une profonde analyse et intériorisation de l'œuvre. Elle est enfin apprise à l'orchestre, à la fois par mode "convention" et par mode expression/répétition. La gestique du chef d'orchestre, comme la langue des signes, possède des éléments universels adaptables à toutes les situations.

Pour rester dans le domaine de la création artistique, la richesse expressive du geste est évidente dans le mime, les arts chorégraphiques orientaux, l'art chorégraphique tout court ou même, par exemple, dans les ombres chinoises.

Toutes ces manifestations expressives du geste, utilitaires ou esthétiques, ont en commun de s'adresser à l'œil et, sauf dans le cas des ombres chinoises, ou du chef d'orchestre quand il utilise une baguette, sans intermédiaire matériel. On peut remarquer, outre la richesse du geste, les rapports qu'il entretient avec la parole, à la fois lié à elle, à la fois autonome. On remarquera également que dans ces exemples, le "geste à nu" est, comme la parole, exclusivement sémiotique : il ne sert qu'à faire connaître et, dans l'exercice de cette fonction, il ne joue de rôle ni ergotique ni épistémique. On va voir maintenant qu'avec le "geste à nu", une partie seulement de la fonction sémiotique du geste est couverte.

2.4. *Le geste instrumental*

Les trois fonctions du geste ont été jusque-là présentées dans leurs manifestations séparées et exclusives. Le premier intérêt de nommer ces trois fonctions réside dans leur reconnaissance et leur caractérisation. Mais il va sans dire qu'ici, comme dans tous les domaines, la réalité n'est pas riche seulement des catégorisations qu'elle nous inspire, mais des recombinaisons qu'elle nous impose. Ainsi, le canal gestuel est intéressant parce qu'il possède ces trois fonctions, mais il l'est encore plus parce qu'il les combine, en particulier dans cette modalité que nous allons introduire maintenant : le *geste instrumental*. Le *geste instrumental* n'est pas

une quatrième catégorie du geste, c'est, nous le définirons comme tel, une "modalité de communication", à mettre en vis-à-vis du "geste à nu" ; aussi fondamental et nécessaire, il lui est complémentaire. Pour introduire le *geste instrumental* il était nécessaire de présenter au préalable les trois fonctions dont il est composé.

Reprenons dans la continuité du geste sémiotique. Les situations évoquées plus haut avaient en commun, on l'a dit, de s'adresser à l'œil et de ne recourir à aucun intermédiaire matériel consistant. Or, il existe de nombreuses situations où, pour s'exprimer, le geste s'applique à quelque chose. C'est le cas par exemple dans l'écriture et le dessin ou encore dans l'écriture mécanisée (utilisant un clavier alphabétique). Ici s'établit un rapport déterminant avec un objet : le crayon, la plume, le pinceau, le *marqueur* d'une manière générale, le clavier... Une des premières conséquences est qu'il n'est plus véritablement possible de parler du geste sans évoquer les propriétés de ce à quoi il s'applique.

Dans l'écriture, les gestes sont catégorisés et doivent conduire à la réalisation d'objets conventionnellement prédéfinis (les lettres). La quantité de ces objets, donc des différents gestes qui les réalisent, donne une mesure du débit d'information que le canal gestuel est à même de transmettre. Toutefois, l'espace gestuel, c'est-à-dire l'espace physique, mais également les variétés de dynamiques et de trajectoires caractéristiques de l'écriture, sont très contraints. Le geste graphique esthétique - le dessin artistique - ouvre l'espace gestuel. Les variétés de formes et de manières de marquer sont beaucoup plus grandes. De ce fait, et parce que les langages esthétiques sont par essence évolutifs, il n'a pas les contraintes du geste d'écriture. Ceci permet de mettre en évidence une circonstance importante : les propriétés physiques du marqueur interviennent directement dans le processus d'expression. Manipuler un crayon ne se fait pas de la même façon que manipuler une plume, un pinceau ou un rouleau. Le marqueur conditionne l'exécution du geste et détermine la nature de l'information émise qui est alors une composition subtile de ses propriétés et de la volonté ou des désirs du sujet.

L'écriture mécanisée extrapole la situation de l'écriture manuelle. Au titre d'une catégorisation plus radicale, éliminant toute réalisation imprécise de la lettre, le clavier (de machine à écrire) conditionne et uniformise le geste. Pour cette tâche parfaitement fermée qu'est la production de séquences de signes pris dans un répertoire fini, le clavier augmente l'efficacité du geste. Si l'on a besoin de quantifier la capacité d'émission informationnelle du canal gestuel, la situation de l'écriture au clavier permet de le faire pour l'une de ses dimensions : pour un sujet entraîné, le choix de 10 éléments (touches) par seconde parmi un ensemble de 6 ou 7 dizaines paraît être une limite maximum. Mais peu important ici les données quantitatives exactes, remarquons simplement au passage que ce mode fut pendant de nombreuses années le mode exclusif de communication de l'information à l'ordinateur. Il vaut alors comme point de repère, mais aussi comme minimum au-dessus duquel il vaudrait mieux pouvoir se placer à l'avenir.

La fonction du clavier dans l'écriture mécanisée est évidemment déterminante. Toutefois, alors qu'ils se présentent tous deux comme intermédiaires matériels, le

pinceau et le clavier ne jouent absolument pas le même rôle. Les propriétés physiques du pinceau sont importantes, on travaille, différencie, affine ses qualités pour obtenir des effets variés ; par contre, on cherchera, dans la technologie du clavier, l'uniformité, la régularité, le minimum de résistance à l'enfoncement des touches¹. En première analyse, un clavier constitué de touches fictives, simplement visualisées tout en opérant une détection de leur sélection (comme dans les "écrans tactiles"), remplit parfaitement la fonction voulue. En fait, dans cette situation, le rôle du clavier n'est pas tellement matériel, il est normatif et catégorisant pour le geste, c'est-à-dire qu'il conduit celui-ci dans des comportements types (avec plus ou moins de marge d'erreur), comportements que l'on pourrait apprendre en présence du dispositif et restituer en son absence. En un mot, il y a contrainte, mais pas interaction. Cette différence est essentielle et permet, après avoir distingué le "geste qui s'applique à quelque chose" du "geste à nu", de distinguer le geste "interactif" du geste "unidirectionnel" (exclusivement sémiotique). Le geste ne peut évidemment être interactif que lorsqu'il s'applique à quelque chose. C'est dans ce dernier cadre qu'apparaît le geste instrumental.

Parmi toutes les situations où le geste est important, il y en a une qui est particulièrement remarquable, c'est celle du musicien instrumentiste. Si l'on considère l'ensemble des instruments de musique, on trouve une immense variété de façons de convertir le geste en information sonore. Ainsi, le geste instrumental musical est-il incontestablement un geste sémiotique, qui s'adresse à l'ouïe et dont on peut juger la capacité informationnelle en considérant la richesse de ce que l'ouïe peut recevoir à travers la musique.

Mais ce que le geste instrumental musical a de singulier, c'est qu'il a tous les attributs du geste ergotique : la main est en interaction directe avec des objets physiques (touches, archet, mailloches, etc.) qu'elle manipule, déplace, percute. Elle leur communique une énergie et en reçoit une en réaction. Le geste instrumental musical a également les attributs du geste épistémique puisque pour effectuer toutes ces opérations de haute précision le musicien fait appel à tous les aspects de sa perception tactilo-proprio-kinesthésique. Le geste instrumental musical est un geste de production et l'instrument de musique, prolongement de la main, est un outil. Toutefois, ce qu'il produit est un objet particulier : un phénomène informationnel.

L'évolution technologique de la deuxième moitié du XX^e siècle peut presque entièrement se caractériser par l'émergence du concept d'information, la séparation de l'information et de l'énergie (faisant suite à la séparation, au siècle dernier, de l'énergie et de la matière) et la recherche toujours plus poussée du plus grand rapport quantité d'information / quantité d'énergie. On cherche aujourd'hui, après

1. Le clavier le plus répandu aujourd'hui, le clavier alphanumérique, a pour ancêtre le clavier musical. Le premier clavier fut en effet inventé par le mécanicien alexandrin Ktésibios, en 270 av.J.-C. et fut aussi celui du premier orgue. Il fallait fournir une certaine énergie pour manipuler ses touches, lattes de bois qui ouvraient ou fermaient les tuyaux, qui se jouaient en fait avec les poings [HAU 88].

l'électron, le photon pour porter le quantum ultime d'information, le bit. Avec l'exemple du geste instrumental musical, il apparaît une limite à ce principe : le geste instrumental musical n'est performant dans sa fonction informationnelle que parce qu'il s'effectue avec une certaine dépense d'énergie. Il n'est efficacement sémiotique que parce qu'il est ergotique. Ce n'est que parce qu'il tient un archet d'un certain poids dans sa main et que la corde résiste d'une certaine façon que le violoniste peut créer toutes ces inflexions du son. Ce n'est que parce que les touches de son clavier ont une inertie que le pianiste peut exprimer toutes ses formules et toutes ses nuances. *Ce n'est que parce qu'il y a une interaction et une dépense d'énergie qu'il y a efficacité communicationnelle.*

Le cas du geste instrumental musical est exemplaire. Mais la production d'événements musicaux n'est pas la seule situation où le geste est instrumental. En restant dans le domaine de la création artistique où il est plus facile de trouver des exemples riches et démonstratifs, on peut considérer sous le même angle le geste du marionnettiste. La marionnette est un instrument, l'expression que lui communique le marionnettiste résulte de l'intériorisation qu'il a fait de ses propriétés physiques et de l'exercice d'un geste instrumental au sens où ces propriétés interagissent directement avec les intentions de l'artiste. En raison de sa richesse et de la variété de ses formes, nous prendrons le geste instrumental musical comme prototype du *geste instrumental* tout court.

On considérera alors le *geste instrumental* comme une modalité de communication spécifique du canal gestuel, complémentaire du "geste à nu" et on le caractérisera de la façon suivante :

- il s'applique à un objet matériel et il y a *interaction physique* avec celui-ci,
- dans le cadre de cette interaction se produisent des phénomènes physiques différenciés dont les formes et les évolutions dynamiques peuvent être maîtrisées par le sujet,
- ces phénomènes peuvent alors devenir les supports de messages communication-nels.

Le geste instrumental est un geste de production, mais parmi les gestes ergotiques, il se particularise (et c'est en cela que nous avons besoin de ces deux termes) par le fait que les objets qu'il produit ou qu'il transforme sont des phénomènes informationnels.

Pour compléter cette caractérisation du canal gestuel, nous allons montrer maintenant, toujours à partir de l'exemple de la musique, que l'on peut dresser une *typologie* précise du geste instrumental.

Typologie du geste instrumental

\ L'instrument est au centre de cette typologie. Sa fonction première est de convertir le geste en un phénomène sensible (acoustique, visuel, etc.). Dans le contexte des technologies traditionnelles où il n'y a ni source énergétique annexe ni relais, l'énergie du phénomène produit est intégralement fournie par le geste. Deux

faits permettent alors de poser les premiers fondements d'une typologie du geste instrumental : la nécessité d'une relative permanence de l'instrument au cours du jeu instrumental, l'existence d'une chaîne énergétique directe du geste au phénomène sensible. Le geste instrumental se subdivise alors en deux premières composantes que nous appelons respectivement le *geste d'excitation* et le *geste de modulation*.

Le *geste d'excitation* est la composante du geste qui fournit l'énergie que l'on retrouvera, avec un rendement plus ou moins élevé, dans le phénomène sensible. Par exemple le geste de percussion d'une membrane vibrante est un geste d'excitation, la manipulation de l'archet du violon par la main droite également. Dans le geste d'excitation passent toutes les déterminations relatives à l'intensité de l'acte donc à sa portée spatiale (en situation naturelle) et toutes les variations que l'on peut y inscrire.

Le *geste de modulation* est relatif à une autre dimension, complémentaire : la modification, dans le cadre de sa permanence, des propriétés de l'instrument. Cette modification affecte la relation du geste d'excitation au phénomène sensible et introduit ainsi une autre dimension porteuse de variations expressives. C'est par exemple le geste de la main gauche du violoniste qui modifie la longueur des cordes (et en conséquence la hauteur du son). Cette action peut être fatigante pour l'instrumentiste, mais l'énergie qu'il dépense ne se transmet pas dans le phénomène sonore. On comprend qu'à ce titre, le geste de modulation ne joue pas du tout un rôle équivalent à celui du geste d'excitation au niveau de l'expression, de la symbolique. Il existe deux catégories de modulations : les modulations continues (on dira paramétriques) comme la variation de la longueur d'une corde, d'un tuyau, d'une tension etc., et les modulations essentiellement discrètes et catégorielles (on dira structurelles), comme celles qui consistent à changer les registres en jeu dans un orgue à tuyaux. Une modulation paramétrique, pour des raisons pratiques, peut très bien être quantifiée, discrétisée, comme sur la guitare par exemple, où des barres déterminent une série discrète de longueurs pour les cordes, mais il y a une très grande différence entre ce type de discrétisation d'une variable qui est en elle-même continue, et la modification structurelle où il s'agit de sauts catégoriels, comme l'ajout ou la suppression d'un tuyau dans le jeu d'orgue. La modulation paramétrique et la modulation structurelle peuvent s'envisager pratiquement sur tous les principes d'instruments musicaux et, par extension sur tous les instruments au sens général. On comprend alors qu'il s'agit aussi ici d'éléments déterminants quant à la forme, la structure et la fonction des objets informationnels produits.

Une dernière dimension à cette typologie de base est importante à considérer. Dans le domaine des instruments de musique, il est rare qu'un instrument se présente comme un simple objet monolithique. Au contraire, comme dans le piano par exemple, on a souvent une juxtaposition de plusieurs instruments élémentaires, qui présente l'intérêt de prédéfinir des modulations (paramétriques ou structurelles) en les réalisant toutes, selon une échelle, sur autant d'exemplaires qu'il est nécessaire. Il faut alors un geste spécifique pour choisir ces éléments au moment du jeu. Celui-ci ne peut se ramener ni à un geste d'excitation ni à un geste de modulation dans la mesure où il n'y a ni communication d'énergie ni modification

de l'objet. Nous réservons le terme de *geste de sélection* ou *geste déictique* à cette troisième composante.

Le geste d'excitation, le geste de modulation et le geste de sélection sont les termes de base de cette typologie, ils sont d'une grande généralité et l'on peut vérifier leur pertinence pour toutes les situations instrumentales. Par ailleurs, un parallèle peut être tenté entre ces éléments typologiques et ceux du langage : le geste d'excitation peut être rapproché du verbe, le geste de modulation de l'adjectif, le geste de sélection du nom. Sur un instrument complexe, le geste instrumental construit des phrases où ces trois composantes se combinent, parfois de manière très subtile.

Après cette présentation des propriétés du canal gestuel, nous pouvons envisager son introduction dans le cadre de la relation avec la machine.

3. Le canal gestuel dans la relation avec la machine

3.1. Interfaces, capteurs, effecteurs, transducteurs

La machine informatique est un univers de phénomènes qui n'interagissent pas naturellement avec l'environnement ou avec l'homme. La première fonction de toute interface est d'établir les conditions d'une interaction. Pour le canal gestuel, le seul où la relation est susceptible d'être informationnelle dans les deux sens, mais également énergétique, il faut envisager deux organes à l'interface :

- un organe chargé de convertir les phénomènes gestuels en signaux recevables par la machine : le *capteur* ;
- un organe chargé d'"informer l'énergie", c'est-à-dire de passer d'un phénomène purement informationnel à un phénomène physique énergétique structuré : l'*effecteur*.

Les effecteurs ne sont en général utilisés que dans les interfaces machine-environnement ; en robotique, ce sont les moteurs aux articulations des bras manipulateurs ou aux roues des robots mobiles. Pour prendre en compte la dimension ergotique du canal gestuel, il est nécessaire d'introduire des effecteurs du côté des interfaces machine-homme.

On appellera ci-après *transducteur* l'organe, capteur, effecteur ou combinaison des deux, associé à son conditionnement matériel, qui assure, au niveau des phénomènes et des signaux, les fonctions nécessaires à l'interaction. Le *transducteur* se distingue de l'*interface* qui comprend, outre les fonctions précédentes, divers traitements et conditionnements purement informatiques.

Avant de présenter plusieurs exemples de dispositifs exploitant d'une manière ou d'une autre le canal gestuel, nous allons considérer quelques aspects de la technologie des transducteurs pour le canal gestuel.

3.2. Les technologies des transducteurs gestuels

Les technologies actuellement utilisées pour capter les phénomènes gestuels et produire les retours physiques sont en fait très dépendantes de la nature du dispositif et de la fonction qu'on entend lui faire remplir. On observe essentiellement deux situations : celle où le geste s'applique à un objet et celle où le geste s'effectue sans contact matériel d'aucune sorte. Il est clair que seule la première peut éventuellement inclure une composante ergotique puisque celle-ci suppose un échange énergétique avec un objet extérieur au sujet. On distinguera donc le cas des dispositifs *sans contact* et celui des dispositifs *avec contact*.

3.2.1. Dispositifs sans contact

Il ne peut être question ici que de *capteurs*, plus exactement de *télécaptag*.

La saisie optique des configurations et mouvements de la main (ou éventuellement du corps tout entier) peut se faire à l'aide d'une caméra. L'information significative est alors extraite du signal vidéo. Dans la mesure où il n'y a aucune isomorphie entre le procédé d'acquisition de l'information visuelle par balayage vidéo et la structure de l'espace des mouvements gestuels, le système d'extraction est complexe. De plus, il doit se contenter d'une information bidimensionnelle pour interpréter un phénomène spatial. Ces dispositifs ne permettent en fait d'extraire qu'une information gestuelle très simplifiée. Des systèmes d'analyse d'image très poussés sont envisageables, mais il ne s'agit plus à proprement parler de capture du geste mais plutôt de *vision artificielle*.

Une variante de ce principe est sa transposition dans le domaine des ondes ultrasonores. L'opérateur est "éclairé" par des sources d'ultrasons et la caméra est remplacée par des microphones appropriés. La résolution et la précision sont naturellement encore plus faibles.

Les autres techniques consistent soit à placer un élément capteur, soit un élément émetteur sur les membres mobiles. Dans le premier cas, le principe le plus performant est celui du capteur Polhemus². Ce capteur utilise trois petites bobines électromagnétiques dont les axes sont orthogonaux, noyées dans un corps en plastique. Fixées sur le membre mobile, elles fournissent un signal électrique dépendant de leur position dans un champ magnétique créé par un autre dispositif distant. L'information captée n'est que celle du mouvement des points où se situent les capteurs, mais elle est intrinsèquement spatiale ; aucun traitement spécifique n'est nécessaire pour restituer l'espace. Dans le second cas, on trouvera l'usage à nouveau d'une caméra et de LED³ placés sur les doigts ou de micros ultrasoniques et de sonars placés sur la main. Dans le cas des LED, la bande passante peut être élevée (de l'ordre de 200 Hz), et le mouvement de chaque doigt est capté, mais l'information doit être analysée.

2. Nom de la société qui commercialise ce dispositif.

3. Diodes lumineuses.

3.2.2. Dispositifs avec contact - Capteurs

Dans le cas des dispositifs avec contact, tous les systèmes, quelle que soit leur nature et leur sophistication peuvent se ranger dans l'une ou dans l'autre des deux catégories suivantes : les *dispositifs à immersion* et les *dispositifs à vis-à-vis*.

Dispositifs à immersion

Ici on "instrumente" l'opérateur, on le considère pour lui-même, indépendamment de toute notion d'interaction effective avec le monde physique et on mesure le plus précisément possible toutes les variables significatives de ses comportements gestuels. C'est en quelque sorte de la proprioception extravertie. Les solutions techniques à ce problème ne sont pas simples car il y a une contradiction de principe entre l'exhaustivité et la précision de la mesure d'une part, et la neutralité du dispositif par rapport à ce qu'il mesure d'autre part. En d'autres termes, plus on veut une mesure précise et exhaustive, plus le support matériel des capteurs est lourd et encombrant, ce qui fait que les gestes captés sont ceux d'un opérateur handicapé. Il n'y a pas de solution idéale à ce problème dans l'état actuel de la technologie.

Les dispositifs à immersion sont d'une manière générale constitués d'une structure matérielle sur laquelle sont montés des capteurs. On distingue principalement les gants ou combinaisons de données d'un côté (structures support continues), les exosquelettes de l'autre (structures discrètes). La précision de capture ne dépend pas beaucoup du type de structure. Elle est déterminée par celle des capteurs et par leur nombre dans les deux cas. Du gant à la combinaison, il n'y a qu'une différence de degré d'immersion, différence que l'on retrouve entre les exosquelettes qui ne prennent que la main et ceux qui prennent le corps dans son entier.

Dans les technologies de captage du mouvement, on trouve essentiellement la détection de déformation de fibres optiques, de jauges de contraintes, le déplacement de curseurs sur pistes potentiométriques. On trouve aussi des capteurs à effet Hall et à effet inductif.

Dispositifs à vis-à-vis

Dans ce cas, on envisage par principe la situation comme une interaction : l'opérateur agit sur un objet, lequel fait explicitement partie de la scène, et ce que l'on mesure n'est pas le comportement gestuel intrinsèque mais les variables représentatives de l'interaction entre l'opérateur et l'objet. La présence explicite de l'objet impose alors certaines contraintes telles que la caractérisation et la prise en considération de ses aspects propres : forme, degrés de déformabilité ou de liberté, trajectoires, articulations, inerties, frottements etc. Mais en contrepartie, la précision et les performances dynamiques peuvent atteindre des niveaux véritablement opératoires.

Les dispositifs à vis-à-vis sont très variés, cela va du bouton rotatif au clavier multi-morphologies en passant par les "joysticks", poignées, bras-maîtres. La technologie des capteurs est qualitativement la même que pour les dispositifs à immersion.

3.2.3. Dispositifs avec contact - Effecteurs

C'est à ce niveau qu'une discrimination radicale s'opère entre les dispositifs à immersion et les dispositifs à vis-à-vis. Le problème posé aux premiers à propos des capteurs est décuplé lorsqu'il s'agit des effecteurs. Pour ne pas entraver les gestes de l'opérateur, la présence mécanique propre du dispositif doit être minimale ; ce qui impose une limite intrinsèque à l'installation d'un retour de l'ordinateur vers l'opérateur. Ce retour peut être de plusieurs natures : **retour simplement tactile**, s'adressant à ce que l'on appelle la *perception tactile cutanée simple*, ou **retour d'effort** s'adressant à la *perception tactilo-proprio-kinesthésique*. Les forces et les déplacements mis en jeu dans le second cas sont sans commune mesure avec ceux du premier : la perception d'un obstacle dur et de son immobilité ou de son déplacement spécifique peut exiger des forces de plusieurs centaines de kgf (ou daN si l'on préfère) tandis qu'il s'agit de quelques grammes (grammes-force en toute rigueur) dans le cas de la perception d'un état de surface ou de la simple information du fait qu'il y a contact entre la main et cette surface.

Plus généralement, la perception tactilo-proprio-kinesthésique se constitue à partir de phénomènes mécaniques d'une certaine qualité dont les caractéristiques importantes sont : la puissance élevée, la forte bande passante (les forces ou déplacements en jeu peuvent atteindre des fréquences voisines de 1 kHz), le grand nombre de degrés de liberté ou de déformabilité des objets (la main dispose, rappelons-le, de 23 degrés de liberté).

De fait, les performances des effecteurs exigées pour un retour d'effort qui ait un sens au plan communicationnel sont incompatibles, du moins en l'état actuel de la technologie, avec le principe des dispositifs à immersion. Ces derniers permettent tout au plus une approche du *retour tactile*, ce qui n'a rien à voir.

Les technologies du retour tactile sont actuellement les suivantes : ruban piezo-électrique, alliages à mémoire de forme, bobines vibrantes de type haut-parleur, ballonnets gonflables, ... Celles du retour d'effort sont essentiellement basées sur les moteurs électromagnétiques et les moteurs hydrauliques.

Nous présentons maintenant quelques exemples de réalisations qui introduisent d'une manière ou d'une autre le canal gestuel dans la relation avec la machine.

3.3. Quelques dispositifs et systèmes

Il ne s'agit pas dans ce chapitre de faire une revue technique de tous les dispositifs, de leurs performances et de leurs applications, mais de donner un aperçu des directions principales du développement des systèmes gestuels actuels.

3.3.1. Bras-mâîtres et bras-esclaves - La télémanipulation

Un précurseur de la communication gestuelle est la *télémanipulation* sous ses diverses formes. Les premiers dispositifs de télémanipulation, mis en œuvre pour manipuler à distance des objets dangereux (radioactifs par exemple), étaient de simples dispositifs de transmission mécanique homomorphe (pantographes). Ils ont été rapidement remplacés par des systèmes utilisant l'électricité comme moyen de transmission. Dans la télémanipulation il n'y a pas à proprement parler de machine au sens informatique du terme, mais seulement deux organes complémentaires : celui qui capte les mouvements de l'opérateur et les transforme en signaux électriques que l'on peut alors transmettre - on l'appelle en général le "bras-mâitre" - et celui qui, au bout de la chaîne de transmission effectue l'opération inverse, c'est-à-dire transforme le signal électrique en mouvements images des mouvements de l'opérateur - le "bras esclave". Le bras esclave et le bras maître peuvent être d'ailleurs exactement symétriques ; les moteurs montés sur l'un et sur l'autre pouvant jouer indifféremment le rôle de restitution de l'effort de l'opérateur sur l'objet manipulé, du côté de l'objet, ou de restitution de la résistance de l'objet aux mouvements de l'opérateur, côté opérateur.

Il peut y avoir une machine entre les deux, réalisant par exemple, par amplification/atténuation, un changement d'échelle entre l'espace de l'opérateur et celui de l'objet télémanipulé. Mais l'on ne peut pas véritablement parler de traitement au sens informatique du terme, et, d'autre part, s'il y a une machine, elle n'est qu'un intermédiaire d'interaction entre l'opérateur et un objet réel. Toutefois, dans la mesure où le signal qui circule entre le maître et l'esclave permet de restituer les mouvements de l'un à l'autre, c'est qu'il contient une *information* relative à ces mouvements : geste de l'opérateur, réaction de l'objet. De là, il n'y a qu'un pas à franchir pour faire de cette information l'entrée et/ou la sortie d'une machine informatique.

3.3.2. Le système GROPE, université de Caroline du Nord - Etats-Unis

Le projet GROPE, démarré en 1967 par Frederick Brooks au Département d'informatique de l'université de Caroline du Nord aux Etats-Unis [BAT 71], [BRO 88], [BRO 90], est probablement le premier à avoir mis en œuvre un dispositif à retour d'effort dans une relation non plus de télémanipulation, mais d'interaction avec un processus informatique.

Centré sur une application cible : la recherche de liaisons chimiques entre molécules complexes par simulation et représentation graphique, le projet GROPE a développé en plusieurs étapes divers dispositifs de manipulation, à 2, 3 puis à 6 degrés de liberté, dans le but de restituer à l'opérateur une information tactile (*haptic display*) coordonnée à la visualisation. Dans une version plus récente (1988), le dispositif de manipulation est un bras-mâitre à 6 degrés de liberté, de grandes dimensions muni d'une poignée à l'extrémité. Dans l'une des applications, l'opérateur manipule à l'aide de ce bras une petite molécule qu'il essaie d'arrimer à une plus grosse (l'arrimage correspond à l'établissement de la liaison chimique), le

tout lui étant présenté sur un grand écran. Les molécules sont simulées par un calcul géométrique et un calcul des champs de forces d'interaction. En manipulant la poignée, l'opérateur produit les informations spatiales qui commandent les déplacements de la molécule à arrimer. La simulation calcule alors les 6 composantes de force de l'interaction envoyées au bras-maître. En s'aidant de ses sensations tactiles, l'opérateur peut ainsi découvrir les liaisons chimiques possibles.

Les performances de ce dispositif sont relativement limitées : le bras est encombrant, la force maximale ramenée au point de manipulation est de l'ordre de 3 N, et la rapidité de réponse des moteurs ainsi que la fréquence d'échantillonnage des données gestuelles (de 20 à 80 Hz) sont assez faibles. La réalité mécanique propre du bras "pèse" sur ses performances et sa compensation numérique est vite limitée par des instabilités prohibitives pour le fonctionnement fin. Par ailleurs, la lourdeur des calculs de simulation, combinée aux temps de réponse importants de la chaîne électro-magnéto-mécanique du dispositif empêche d'atteindre les temps de boucle nécessaires au canal gestuel (de l'ordre de la ms). La conséquence est que les objets simulés restent relativement "mous" et, plus généralement, que la finesse de restitution des phénomènes pour la perception proprio-tactilo-kinesthésique reste en dessous du seuil nécessaire au réalisme.

Dans le même laboratoire, d'autres dispositifs sont expérimentés, tels ce cyclo-cross à retour d'effort qui permet la visite interactive d'un bâtiment virtuel. Le vélo est fixe, naturellement, mais le cycliste reçoit, à travers un casque vidéo stéréoscopique, les images d'un décor synthétique qui se modifient en cohérence avec ses mouvements sur le pédalier. Ce dernier est couplé à un transducteur électromécanique qui rend le pédalage plus ou moins facile selon que l'opérateur se trouve dans une montée (virtuelle), un terrain plat ou une descente. Il s'agit là du captage d'un comportement gestuel (corporel) exclusif et complètement spécifique.

3.3.3. VIDEOPLACE - Myron Krueger, université de Wisconsin - Etats-Unis

Myron Krueger, à l'université de Wisconsin, a mis au point successivement, depuis 1969, un certain nombre de dispositifs, [KRU 77], permettant une interaction entre le monde réel des opérateurs et le "monde virtuel" de l'ordinateur, ainsi que des situations étonnantes d'interactions de plusieurs individus distants, dans un même espace virtuel. Ces expériences relèvent des *Réalités Virtuelles* mais elles méritent d'être évoquées ici en raison de l'exploitation particulière qu'elle font du geste pour communiquer avec la machine : une image globale de l'opérateur est captée par une caméra ; de cette image est ensuite extraite une information simplifiée et significative, le contour par exemple, projetée sur un grand écran, face à l'opérateur. Cette information est alors une entité propre dans un univers visuel virtuel avec lequel elle interagit. L'opérateur développe ses comportements en se servant, comme contrôle, de la vision de son image réduite en interaction avec les objets de l'univers visuel virtuel. L'image (le contour) de l'opérateur peut alors, par exemple, "saisir" les images d'objets sur l'image d'un bureau, jouer avec des images d'instruments de musique, etc. Une exploitation spectaculaire du principe réalise la

même situation avec deux opérateurs en deux lieux distants. On restitue à l'un et à l'autre, chacun en son propre lieu, la même image. Les images des opérateurs interagissent alors entre elles ou peuvent collaborer pour effectuer une tâche (virtuelle) commune supposant la manipulation des mêmes images d'objets sur un même bureau virtuel.

3.3.4. Le Simple-Simon's GesturePad™ de l'Institut de recherche sur la perception, Eindhoven - Pays-Bas.

Développé par Gerrisen & al. [GER 90], chercheurs de l'*Instituut voor Perceptie Onderzoek* (IPO) de Eindhoven et commercialisé par Philips, ce système présente des points communs avec l'approche précédente. Il consiste en un clavier spécial et une souris connectés à l'ordinateur ainsi qu'un logiciel qui affiche à l'écran des postures de mains schématisées prises dans un répertoire prédéfini. La posture qui s'affiche dépend alors de la touche enfoncée, mais d'une façon telle qu'elle corresponde sensiblement à la posture réelle de la main en train d'enfoncer cette touche. Par ailleurs, la souris permet, dans le même temps, de positionner spatialement la posture sélectionnée sur l'écran. Deux opérateurs distants, dont les ordinateurs ainsi équipés sont reliés, peuvent alors communiquer par le geste. Les opérateurs en question peuvent être un conférencier et son public suivant les explications du premier sur grand écran. Le dispositif permet alors, un peu à la manière du *geste accompagnant la parole*, de présenter et commenter de manière vivante et dynamique l'information affichée à l'écran.

3.3.5. Le gant de données VPL

Le gant de données (*dataglove*) de la firme VPL créé par Jaron Lanier et Jean-Jacques Grimaud a fait une entrée pour le moins remarquée aux environs de 1985. C'est un gant sur lequel sont montés d'une part un capteur de position Polhemus, d'autre part un ensemble de fibres optiques sensibles aux mouvement de courbure des doigts. Associé au HMS (*Head Mounted Screen*, ou paire d'écrans montée sur les yeux) et au procédé de contrôle d'une image stéréoscopique de synthèse par les mouvements de la tête, il est à l'origine du courant médiatique des *Réalités Virtuelles*. Ce dispositif est capteur de gestes dans la mesure où il permet d'envoyer à l'ordinateur des informations sur la configuration et les déplacements de la main. Mais il ne mérite certainement pas toute la publicité qu'on a pu en faire à une époque si l'on y regarde de près quant à la finesse et la précision de cette capture. La capture des mouvements par le dispositif Polhemus est relativement précise, mais celle des configurations des doigts par les fibres optiques ne l'est pas du tout. De plus elle présente de gros défauts de fiabilité et de reproductibilité. Les gestes de la main saisis par ce dispositif sont en fait extrêmement rudimentaires, en sorte que le *dataglove* n'est guère qu'une *souris spatiale*.

3.3.6. Le gant CyberGlove, de la société Virtex

Ce gant, conçu par Jim Kramer, fondateur de *Virtex* à Stanford, reprend le même principe, mais avec une autre technologie : 22 capteurs à jauge de contrainte. Incomparablement plus performant, ce dispositif permet effectivement d'exploiter la main dans une situation communicationnelle du type "langage des sourds-muets" ou "geste du chef d'orchestre". Une application typique et parfaitement au point consiste à effectuer un certain nombre de configurations de la main en demandant à l'ordinateur de les apprendre et de les associer à des lettres de l'alphabet. Celui-ci effectue cette tâche grâce à un logiciel type réseau de neurones. Dans une seconde phase, l'opérateur effectue les gestes appris par le logiciel, lequel identifie alors les lettres correspondantes. Le nombre de lettres ainsi identifiables est largement égal au nombre de lettres de l'alphabet, ce qui donne une mesure des capacités discriminantes du système de capture.

A la suite des gants de données viennent les "combinaisons de données" (*data suit*) qui généralisent la capture du geste manuel à celle du geste corporel. Ces dispositifs sont typiquement des *dispositifs à immersion* comme on les a déjà caractérisés plus haut, fonctionnant exclusivement en capteurs.

Les applications de tels dispositifs, gants ou combinaisons sont multiples, allant de la commande de robots, la simulation d'animations, l'aide à la conception architecturale... aux jeux vidéo. Enumérer toutes les applications ici reviendrait à écrire un chapitre sur les *Réalités Virtuelles*, ce qui est exclu vu la quantité d'idées fausses et d'illusions qu'il faudrait commencer par détromper. Il convient en effet, à propos de ces dispositifs, gants ou combinaisons, de mettre les choses à une plus juste place que celle que leur ont donnée les différentes publicités sous l'étiquette des *Réalités Virtuelles*. On a parlé de manipulation d'objets virtuels, de déplacements, de voyages dans des mondes qui ne le sont pas moins, dans l'intérieur de l'ordinateur, etc. Si le principe de la projection d'une image de l'opérateur dans l'espace informationnel de l'ordinateur est intéressant au fond des choses, ses mises en œuvre effectives sont loin de répondre aux fantasmes que les publicités n'ont cessé d'exciter depuis un certain nombre d'années. Les performances, aussi bien des capteurs que des machines et systèmes de simulation dans cette vision totalitaire des systèmes à immersion, sont très en dessous de ce que la perception et le système cognitif humains exigent pour croire, une fois le premier effet de surprise passé, qu'il s'agit de réalité.

3.3.7. Le gant à retour tactile de Advanced Robotic Research Ltd (ARRL)

Un palliatif intéressant aux défauts du gant de données utilisé pour des manipulations d'objets virtuels est l'adjonction de dispositifs produisant la sensation du toucher. Le principe mis au point par Advanced Robotic Research Ltd (ARRL) dirigé par Robert Stone près de Manchester en Grande-Bretagne, en collaboration avec la société Airmuscle Ltd - le *Teletact* - utilise 20 ballonnets situés au contact de toutes les phalanges et de la paume de la main. Chaque ballonnet est relié à un

compresseur commandé par l'ordinateur et produit localement une pression engendrant la sensation d'un contact. Pour fournir les bonnes pressions aux bonnes phalanges et au bon moment en fonction de la manipulation, un dispositif symétrique d'apprentissage a été mis au point. Il s'agit d'un gant identique au précédent où les ballonnets sont remplacés par autant de capteurs de force. La phase d'apprentissage s'effectue alors dans une opération de manipulation d'un objet réel pendant laquelle on enregistre les informations de force de contact qui seront ensuite restituées à l'identique lors de la situation de manipulation de l'objet virtuel. Il n'y a pas à proprement parler de modélisation des objets et de leur interaction avec l'opérateur, il s'agit d'un relevé phénoménologique ad'hoc, pour chaque cas d'espèce.

Il est bien clair que l'information tactile renvoyée ici, n'est à nouveau qu'une *information*. En particulier, rien n'empêche de traverser ou écraser les objets. Il ne s'agit pas d'un retour d'effort, mais d'un retour tactile. Il s'adresse à la perception tactile cutanée et non à la perception tactilo-proprio-kinesthésique.

3.3.8. *L'exosquelette de la main de EXOS*

Le "Dexterous Hand Master" de la société EXOS à Burlington (EU) est un exosquelette articulé qui se monte sur la main. Les variations angulaires de chaque paire de phalanges articulées sont mesurées par un capteur angulaire monté à l'articulation des exophalanges correspondantes. La précision de la capture est très bonne mais le dispositif, bien que très léger (environ 30 g par degré de liberté), est une entrave importante au naturel des évolutions de la main. Une particularité intéressante de ce dispositif est la nature du retour tactile : il est réalisé par un actionneur vibrotactile, c'est-à-dire une petite bobine de haut-parleur qui fonctionne à 250 Hz, fréquence à laquelle la peau présente un seuil de sensibilité maximum aux vibrations. Les modèles qui contrôlent le retour tactile sont, comme précédemment, assez simplistes. Ce sont des modèles fonctionnels basés sur la tabulation de l'intensité du stimulus en fonction de la distance. L'échantillonnage des données du mouvement se fait à 60 Hz.

3.3.9. *Le manche de commande à retour d'effort de MATRA-ESPACE*

Développé récemment par MATRA-ESPACE, le "Robotop", manche de commande à retour d'effort est une poignée de pilotage à 3 degrés de liberté, dotée de capteurs de force et de moteurs. Il permet de percevoir des champs de force qui canalisent le geste de l'opérateur et l'assistent dans des opérations telles que la génération de trajectoire ou, plus généralement lui permettent de percevoir des formes en mode tactilo-kinesthésique. Ce dispositif a été construit pour des applications telles que la téléopération d'un robot manipulateur où l'on retrouve le concept bras-maître/bras-esclave, ou l'interaction avec un environnement virtuel généré par ordinateur. Le conditionnement du retour d'effort se fait par programmation dans la station informatique à laquelle le manche est relié. Celle-ci reçoit les signaux des capteurs de force et fournit les signaux de retour à un étage de puissance qui commande les moteurs.

Il entre dans la catégorie des *dispositifs à vis-à-vis* et présente à ce titre des performances significatives en termes de retour d'effort et de perception tactilo-kinesthésiques. L'ambitus de déplacement spatial est d'une dizaine de cm sur lesquels peuvent être développées des forces de l'ordre de 25 N (2,5 kgf). Les modèles pour le retour d'effort sont des modèles "fonctionnels", c'est-à-dire basés sur des profils types de fonctions de transfert force-position ou force-vitesse. On y trouve cependant quelques notions métaphoriques telles que "forces élastiques", "profils de raideur", "frottement visqueux", "champ de potentiel attractif ou répulsif", etc.

4. Le geste instrumental et la communication homme/machine

A la fin du 2^e chapitre nous avons introduit le geste instrumental à partir du geste instrumental musical et nous avons montré qu'en tant que geste sémiotique, il tenait sa performance du fait qu'il est ergotique. Nous l'avons alors promu au rang de "modalité de communication" complémentaire du "geste à nu". Nous allons maintenant l'envisager comme modalité de communication avec l'ordinateur.

4.1. Le concept de communication instrumentale

La communication instrumentale a existé avant l'ordinateur mais c'est avec l'ordinateur que le concept prend toute sa pertinence. L'ordinateur introduit en effet une circonstance fondamentalement nouvelle : il fait de l'information un objet tangible, en substance un signal numérique qui peut être transmis, représenté, mémorisé, traité, restitué et utilisé à des fins de commande de systèmes matériels ou de communication humaine. C'est ce contexte qui permet d'envisager une exploitation fine et rigoureuse de tous les phénomènes informationnels propres à l'interaction instrumentale. Ainsi, en même temps que nous proposons une généralisation du terme de *communication instrumentale*, nous posons ici le principe de l'exploitation du geste instrumental pour la communication homme/machine.

Avant de décrire les conditions de sa mise en œuvre, allons un peu plus loin dans le concept.

Rappelons les éléments donnés au 2^e chapitre : le geste instrumental se caractérise par le fait qu'il s'applique à un objet matériel avec lequel s'établit une interaction. Dans le cadre de cette interaction se produisent des phénomènes physiques différenciés dont les formes et les évolutions dynamiques peuvent être maîtrisées et modulées par le sujet. Enfin, ces phénomènes peuvent être supports de messages informationnels.

En fait, l'interaction naturelle de l'être humain avec les objets de son environnement, donc avec ses instruments, n'est jamais exclusivement gestuelle. Elle s'établit selon plusieurs canaux émetteurs et récepteurs simultanés et

intimement corrélés : toute relation instrumentale naturelle est intrinsèquement *multisensorielle*. La vision, l'audition et la perception tactilo-proprio-kinésthésique collaborent à un niveau profond pour constituer les éléments cognitifs et construire les actions motrices. L'interaction gestuelle n'est donc qu'une composante et si l'on a fait valoir, pour le geste instrumental, une combinaison des fonctions ergotique, sémiotique et épistémique, il faut considérer la relation instrumentale complète à son tour comme une combinaison : une combinaison des canaux gestuel, acoustique et visuel. La notion d'instrument devient ainsi plus large : tout objet avec lequel l'homme peut interagir en exploitant tous ses moyens sensori-moteurs et tel qu'à travers cette interaction il puisse accomplir une certaine tâche. Le concept de communication instrumentale se généralise alors en donnant ce sens à l'instrument et en considérant que la tâche en question est d'ordre informationnel.

Là encore, c'est dans le contexte de l'ordinateur que ces notions prennent leur véritable pertinence. L'ordinateur permet en effet de créer des objets virtuels avec lesquels une interaction gestuelle, acoustique et visuelle peut s'établir. Utilisés comme "instruments virtuels", ces objets permettent d'introduire une communication d'ordre instrumental avec l'ordinateur. On part alors du principe que pour toute tâche ou partie de tâche⁴ il est possible de définir un instrument (instrument de communication) tel que l'ensemble des phénomènes d'interaction de l'opérateur avec celui-ci puisse porter l'ensemble des échanges d'informations nécessaires à la réalisation de la tâche⁵.

Nous allons considérer maintenant les conditions de la mise en œuvre d'une telle forme de communication.

4. *Tâche* a ici un sens très général, il peut s'agir d'une tâche communicationnelle, donc essentiellement entre sujets humains, ou de la commande ou du contrôle d'une opération matérielle. Le terme de communication devient anthropomorphique dans ce dernier cas. Nous reviendrons à la fin sur ce point.

5. Le principe est exposé ici de manière très générale et abstraite ; il a pourtant déjà des exemples bien connus quoique simplistes ; l'icône du Macintosh en est le plus répandu : le fichier, qui n'est qu'une abstraction et un ensemble d'informations dont le support est totalement en dehors de notre espace sensible, est représenté par un objet virtuel. Celui précisément que l'on appelle l'icône. La manipulation de cette icône par le moyen de la souris commande un traitement, par exemple effacer l'information sur le disque. Cet objet virtuel n'est que visuel et sa manipulation ne donne lieu à aucune perception tactile spécifique, mais il n'en répond pas moins dans sa définition comme dans sa fonction, à notre concept d'instrument de communication. Nous pourrions d'ailleurs baptiser ce dernier "icône généralisée" et en profiter pour évoquer un exemple simple d'application : donner aux icônes du Macintosh non seulement une forme géométrique visible, mais un poids proportionnel à la taille du fichier qu'elles désignent et que l'on percevrait à l'aide d'un transducteur gestuel rétroactif lors par exemple d'une tentative de les mettre à la poubelle.

4.2. Interface de communication instrumentale (I.C.I.)

La notion d'instrument virtuel est donc au centre de la communication instrumentale avec l'ordinateur. La première fonction d'une Interface de communication instrumentale sera de permettre la création de tels objets virtuels, soit de simuler des objets physiques manipulables, visibles, audibles et "touchables". Il se pose alors deux catégories de problèmes techniques :

- réaliser la communication périphérique entre l'ordinateur et l'opérateur selon les trois canaux sensori-moteurs : gestuel, acoustique et visuel ;

- réaliser la simulation, c'est-à-dire le système logiciel qui élabore en temps réel les signaux tactiles, acoustiques et visuels à partir de signaux d'entrée gestuels. Ce système doit permettre la simulation d'une variété d'objets aussi grande que possible. Il doit permettre également de définir ces objets en fonction de la tâche.

La liaison gestuelle entre l'opérateur et l'ordinateur est assurée par un transducteur gestuel. Celui-ci doit être rétroactif (ou à retour d'effort) pour assurer la fonction ergotique de l'interaction. Nous décrivons rapidement ci-après le transducteur gestuel rétroactif (TGR) développé par l'ACROE dans le cadre de ses travaux sur la communication instrumentale. Nous donnerons ensuite quelques éléments sur le système ©CORDIS-ANIMA, système de modélisation et simulation des objets physiques, également développé par l'ACROE.

4.2.1. Le ©Clavier Rétroactif Modulaire de l'ACROE

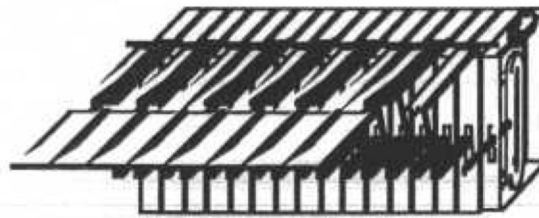
Le ©CLAVIER RETROACTIF MODULAIRE (CRM) de l'ACROE [CAD 81], [CAD 84], [LIS 89a], [LIS 89b], [CAD 90a], [CAD 90b], est un transducteur gestuel à retour d'effort. C'est, dans sa forme nominale, un clavier semblable à un clavier de piano, hormis le fait qu'il ne comprend que 16 touches. Celles-ci peuvent en revanche s'enfoncer de 30 mm. Chacune de ces touches est munie d'un capteur de position sensible à des variations de 4 μ m ainsi que d'un moteur pour la fonction de rétroaction. Son originalité réside dans plusieurs aspects : ses performances, sa modularité et la possibilité de le configurer selon diverses morphologies.

Ses performances en retour d'effort sont dues à la technologie du moteur sous chaque touche (le ©moteur en tranches⁶). Son encombrement est très réduit (13,75 mm : la largeur d'une touche de piano) et peut cependant fournir une force de 80 N avec un temps de réponse de 0,2 mS. Ces performances permettent d'obtenir une véritable sensation de réalisme des objets au niveau du toucher.

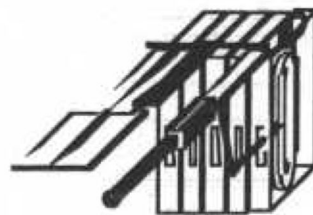
Le dispositif est modulaire en ce sens que l'on peut augmenter ou diminuer le nombre de touches en fonction de l'application. Enfin, une disposition de construction mécanique permet d'utiliser les degrés de liberté capteurs-effecteurs selon différentes morphologies : clavier type piano, joystick à 1, 2, 3 degrés de liberté, pince à 4 degrés de liberté, etc. (figure 1). On notera que c'est l'adoption du

6. Brevet ACROE.

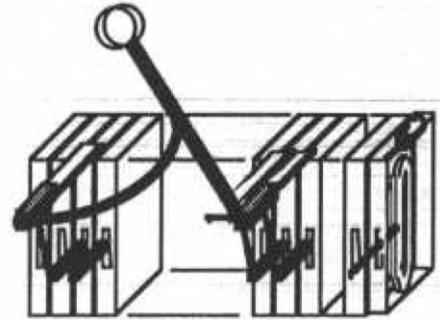
principe du *vis-à-vis* qui autorise ces différentes dispositions et permet ainsi des conditions instrumentales significatives, aussi bien en puissance qu'en généralité.



clavier type piano



Stick 1D



Stick 2D

Figure 1. Le ©Clavier Rétroactif Modulaire de l'ACROE - Diverses morphologies

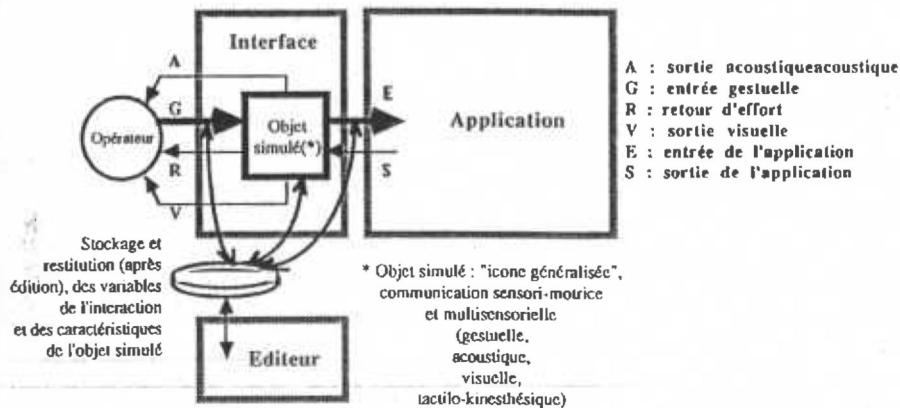
4.2.2. ©CORDIS-ANIMA, système de modélisation et simulation d'objets physiques de l'ACROE

Ce dispositif est associé au système de modélisation et de simulation d'objets physiques en temps-réel ©CORDIS-ANIMA [CAD 79], [CAD 81], [CAD 84], [FLO 91], [CAD 93]. Dans ce système, tout objet est considéré comme un assemblage de masses ponctuelles liées entre elles par des liaisons mécaniques visco-élastiques ou des liaisons non linéaires. Chaque élément (masse ou liaison) est réalisé par un algorithme de simulation individuel. C'est la coordination et l'interaction de tous les algorithmes de simulation élémentaires qui constitue la simulation de l'objet global. A l'aide de ce système, qui est aussi un langage, il est possible de simuler une très grande variété d'objets : objets sonores (cordes, membrannes, plaques, poutres, percuteurs, archets, etc.), objets mobiles ou articulés (marionnettes, véhicules, etc.), fluides, sables, etc.

4.2.3. Editeur de Geste

Enfin, l'interface complète suppose d'autres fonctionnalités, en amont et en aval de la simulation. En amont un environnement permettant la création des objets instruments, la définition de leur structure et l'édition de leurs paramètres. En aval la représentation, l'analyse, l'édition des actions gestuelles. L'ordinateur, avons-nous dit plus haut, fait de l'information un objet tangible ; ici, en l'occurrence, c'est du geste qu'il peut faire un objet puisque toutes les informations relatives à l'interaction de l'opérateur avec l'instrument virtuel peuvent être enregistrées. C'est à ce niveau que de nouvelles latitudes importantes se présentent : le geste et l'instrument deviennent deux objets intégralement caractérisables. De l'un et de l'autre on peut conserver une trace rigoureuse et complète. C'est à partir de cela que l'on peut poser le principe d'une écriture pour le geste, mieux pour l'interaction instrumentale complète. C'est cette condition qui permet véritablement de poser le principe d'une "communication instrumentale". D'un point de vue pratique, c'est-à-dire celui de l'interface, celle-ci doit permettre l'enregistrement, la représentation, le traitement, voire la synthèse des signaux gestuels. Un tel *éditeur de geste* est également développé à l'ACROE [CAD 90c].

Les fonctionnalités de l'interface de communication instrumentale sont résumées dans la figure 2.



Simulation d'objets physiques supports de la communication
Langage de définition de ces objets

Dialogue avec l'application : sous la forme de la manipulation
d'un objet physique simulé (icône généralisée)

Communication de l'information extraite vers l'application
Retour de l'information de l'application vers l'objet

Traitement et édition de l'information de communication

Figure 2. Interface de Communication Instrumentale

Cette présentation du principe de la communication instrumentale avec l'ordinateur ainsi que de l'interface est essentiellement prospective. Les réalisations qui s'y rapportent sont actuellement à l'état de recherche, néanmoins elles sont d'ores et déjà appliquées dans le domaine de la création musicale et de l'image animée et démonstratives dans celui de la robotique : la simulation d'un véhicule dans son environnement et la commande du premier à l'aide d'un transducteur à retour d'effort (réalisées à l'ACROE) ont été utilisées comme méthodes de détermination de trajectoires.

5. Conclusion

Le canal gestuel s'avère riche et multiforme, on a vu ses trois fonctions (épistémique, ergotique, sémiotique) et ses deux modalités : le "geste-à-nu" et le geste instrumental. On a montré que le geste instrumental pouvait être utilisé comme modalité de communication. Il est certain qu'en l'étudiant avec les moyens et l'attention nécessaires on trouvera au canal gestuel un champ d'application considérable, encore insoupçonné. Toutefois il semble qu'un certain nombre de préjugés soient encore à vaincre ; Yvette Hatwell nous en a avertis, le geste et le toucher ne sont pas "bien vus". Afin déjà de couper court aux envies spontanées de lui tourner le dos pour cause de tentative de prise de pouvoir abusif, je terminerai cette habilitation du geste en essayant de préciser quel est son territoire.

Commençons par un point sur les termes. L'homme entretient avec son environnement deux catégories de relations : des relations communicationnelles, avec ses semblables, et des interactions matérielles (physiques, mécaniques, chimiques...), avec le reste. Le terme de *communication* n'a de sens que pour les êtres vivants, l'ordinateur n'est pas un être vivant (et il n'y a pas de preuve du contraire à attendre), le terme de communication avec l'ordinateur est donc stupide.

L'ordinateur intervient entre l'homme et son environnement, humain ou matériel ; mais il existe et existera toujours des liens entre l'homme et son environnement vierges de toute intrusion de la machine. Il faut alors représenter la position de la machine dans l'univers de l'homme à l'aide d'un schéma triangulaire (figure 3). La machine n'est qu'un média, et dans cette fonction, elle peut jouer deux rôles différents (évidemment plus ou moins combinés) : le rôle de média de communication et le rôle de média d'action matérielle. En d'autres termes, on ne communique pas avec la machine, on communique *à l'aide* de la machine. On interagit également à l'aide de la machine, mais cette fois éventuellement *avec* la machine puisqu'elle est partie de notre environnement non vivant. Une troisième fonction peut être invoquée : celle d'agent artificiel autonome, capable d'agir dans l'environnement de l'homme pour y effectuer certaines tâches sans que l'homme n'ait à intervenir : c'est le domaine de l'I.A. et de la robotique de l'autonomie. Cette notion d'autonomie est très attrayante, mais il faut reconnaître, malgré de nombreux résultats spectaculaires, qu'elle est plus une visée qu'une réalité. Dans tous les cas, l'autonomie est bien relative et l'homme doit intervenir de manière assez soutenue

s'il tient à l'accomplissement effectif de la tâche. Par ailleurs, cette autonomie s'arrête à l'existence même de la machine qui a de toute façon besoin de l'homme pour être construite.

En introduisant une relation ergotique entre l'homme et l'ordinateur, nous ne faisons que combler un manque, compléter le schéma triangulaire (figure 3). En effet, les deux formes d'interaction existent entre l'homme et son environnement, elles existaient déjà entre l'ordinateur et l'environnement de l'homme, la fonction ergotique étant remplie par les bras manipulateurs et autres actionneurs de la robotique. Ce sont les transducteurs gestuels rétroactifs qui permettent la complétude du schéma d'interaction homme-machine-environnement. Dès lors, il est véritablement possible de faire jouer à la machine son rôle de média dans les deux situations, de communication et d'action matérielle. Pour excuser les abus de langage à propos de la "communication" homme/machine, on peut alors arguer du fait que pour mener à bien les tâches dans lesquelles il utilise des instruments, des outils, des intermédiaires matériels, l'homme a toujours eu tendance à prêter à ces derniers des attributs de la chose ou de l'être auxquels ils permettent d'accéder. C'est le principe universel et opératoire (mais néanmoins dangereux) chez l'homme, de l'idolâtrie, ou, en termes moins métaphysiques, de la métaphore. En communication, on cherche à doter la machine d'attributs humains (micro qui se comporte comme la périphérie de l'oreille, haut-parleur qui prononce des paroles, écran qui présentent des visages articulés, etc.), en commande d'action matérielle, on utilise des simulations. La *communication homme/machine* est à la limite un terme acceptable en tant que métaphore. Il n'en reste pas moins incomplet puisqu'il ne contient pas la fonction d'interaction matérielle.

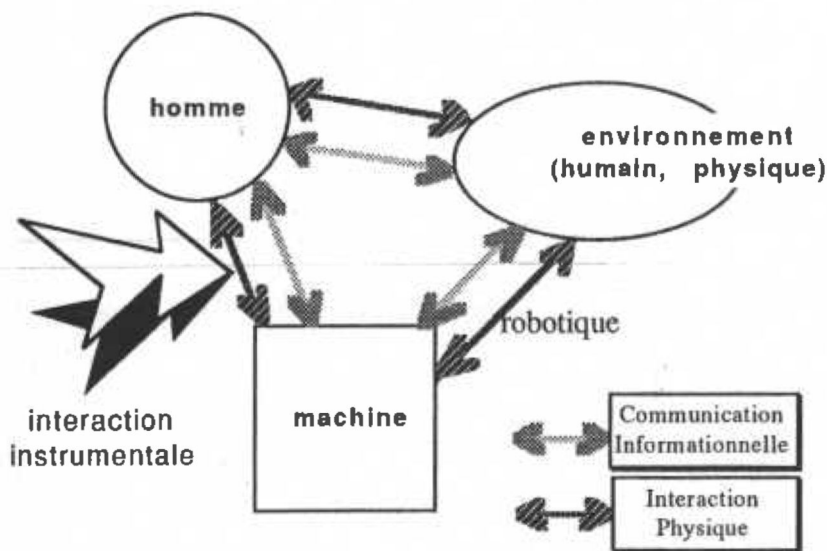


Figure 3. La relation homme/machine/environnement

Quoi qu'il en soit, ce que nous avons introduit ici avec le concept de *communication instrumentale* concerne bien la fonction communicationnelle et prétend, grâce à l'ordinateur, étendre d'une part le domaine de la communication, d'autre part celui de l'interaction physique. Pour résumer et situer le geste puis le geste instrumental dans la relation avec la machine, il nous faut alors présenter un dernier schéma. Parmi les typologies des relations homme/machine en cours, il en est qui distinguent entre communication verbale et non verbale, qui découpent entre modalités visuelles, acoustiques, gestuelles, symboliques, physiques, logiques, métaphoriques, etc. Tous ces critères ont une pertinence, mais il me semble qu'avant de les appliquer, il faut opérer un premier découpage plus fondamental. Je propose deux premières dichotomies : entre interaction ergotique et non-ergotique d'une part, relation de communication et relation d'action matérielle d'autre part (figure 4). La communication instrumentale est à l'intersection de l'ensemble des relations ergotiques et de celui des relations communicationnelles. Le geste instrumental investit évidemment complètement le domaine de la communication instrumentale ainsi que celui de l'action matérielle ergotique. Mais il reste une place non négligeable pour ce que nous avons appelé le "geste-à-nu", incluant si l'on veut les expressions du visage, ainsi que pour la parole, aussi bien pour la communication que pour l'action matérielle non ergotiques.

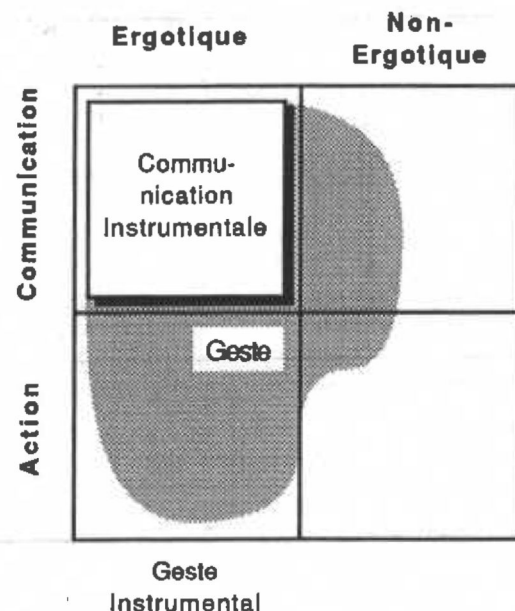


Figure 4. La place du geste dans l'interaction homme-machine

Dans toute l'évolution de la pensée autour de l'ordinateur ce qui est finalement remarquable, c'est le déplacement de l'anthropomorphisme : on est passé d'un *fantasme* anthropomorphique centré sur l'intérieur, le "cerveau artificiel", à une *métaphore* anthropomorphique, beaucoup plus raisonnable et utile, concernant la périphérie, l'interaction. Bientôt, on comprendra que la perspective la plus fascinante n'est pas, comme le prévoyaient les esprits les plus enfiévrés de l'après-guerre, que la "Machine" se substitue à l'homme, le dépassant après que celui-ci lui ait transféré son intelligence, mais qu'en tant qu'outil plus universel que tous les précédents inventés par l'homme, elle intègre toutes les formes de représentations possibles en relation avec tous les modes d'action et de transformation matériels. En toute rigueur, il n'y a donc pas à poser le problème de la "communication" avec la machine, mais plutôt celui des *interactions* entre l'homme et son environnement, l'homme et la machine, la machine et l'environnement de l'homme, et à considérer que l'une des fonctions de la machine est la communication... entre les hommes.

Bibliographie

- [BAT 71] BATTER, J.J. and BROOKS, F.P., Jr., GROPE-I, A computer display to the sense of feel, *Information Processing, Proc. IFIP Congress 71*, p. 759-763. 1971.
- [BEE 89] BEEK, P.J., *Juggling Dynamics*, Free University Press, Amsterdam 1989.
- [BRO 88] BROOKS, F.P., Jr., Grasping reality through illusion : Interactive graphics serving science", 5th Conf. on Comput. and Human Interact, CHI'88. 1988.
- [BRO 90] BROOK, F.P., OUH-YOUNG, M., BATTER, J.J., KILPATRICK, J., Project GROPE ; Haptic Displays for Scientific Visualization, *Computer Graphics*, Vol. 24, n° 4 August 1990.
- [CAD 79] CADOZ, C., Synthèse sonore par simulation de mécanismes physiques vibratoires - Thèse INPG Grenoble France, 1979.
- [CAD 81] CADOZ, C., LUCIANI, A., FLORENS, J.L., Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux transducteurs gestuels rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental, *Revue d'acoustique*, n°59, 1981.
- [CAD 84] CADOZ, C., LUCIANI, A., FLORENS, J.L., Responsive input devices and sound synthesis by simulation of instrumental mechanisms : the CORDIS system, *Computer Music Journal*, n°3, 1984.
- [CAD 90a] CADOZ, C., LISOWSKI, L., FLORENS, J.L., Clavier rétroactif modulaire, *Computer Music Journal*, Vol 14, n° 2, 1990.
- [CAD 90b] CADOZ, C., Commande instrumentale et synthèse sonore ; simulation de l'univers instrumental, in "La Machine perceptive, les moyens de communication entre l'ordinateur et l'homme", 12^e Journées francophones sur l'informatique, Grenoble, Jan. 1990.
- [CAD 90c] CADOZ, C., RAMSTEIN, C.- Capture, Representation and Composition of the Instrumental Gesture, International Computer Music Conference, Glasgow 1990.

- [CAD 93] CADOZ, C., LUCIANI, A., FLORENS, J.L., CORDIS-ANIMA : A Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis, The General Formalism, *Computer Music Journal*, 17, n° 1, p. 19-29. M.I.T. Press, Cambridge Mass. 1993.
- [CUX 85] CUXAC, Ch., Esquisse d'une typologie des Langues des Signes, in *Journées d'Etudes n° 10, Autour de la Langue des Signes* (3 juin 1983), U.F.R. de Linguistique Générale et Appliquée, Université René Descartes (Paris V), p. 35-60.
- [EKM 72] EKMAN, P. et FRIESEN, W.V., Hand movements, *The journal of communication*, 22 December, p. 353-374, 1972.
- [FAN 88] FANTAPIE, H.C., L'analyse de la partition dans la pratique du chef d'orchestre, *Revue d'Analyse Musicale*, n° 10, p. 26-30, 1er trimestre 1988.
- [FEY 87] FEYEREISEN, P., Gestures and speech, interaction and separations : A reply to McNeil (1985), *Psychological Review*, 94, p. 493-498, 1987.
- [FLO 91] FLORENS, J.L., CADOZ, C., The physical Model, Modelisation and Simulation Systems of the Instrumental Universe, in *Representation of Musical Signals*, G. De Poli, A. Picciali, C. Roads, Ed. MIT Press, 1991.
- [GER 90] GERRISSEN, J.F., DAAMEN, J., ITEGEM, J.V., Simple-Simon's GesturePad a puppet for added expressiveness in communication and interaction, CHI '90 Seattle, 1-5 April 1990.
- [HAT 86] HATXELL, Y., *Toucher l'espace, La main et la perception tactile de l'espace*, Presses Universitaires de Lille 1986.
- [HAU 88] HAURY, J., *Le clavier - Marsyas*, n° 5, Mars 1988.
- [KRU 77] KRUEGER, M.W., Responsive environments, *Proc. National Computer Conference*, p. 423-433- 1977.
- [LIS 89a] LISOWSKI, L., CADOZ, C., FLORENS, J.L., Clavier rétroactif modulaire et actionneur modulaire plat, Brevet d'invention français n° 8814064, 1988, extension Brevet International 1989.
- [LIS 89b] LISOWSKI, L., CADOZ, C., Conception, optimization and realisation of extra flat DC linear motors, Proceedings of 4th International conference on electrical machines and drives, IEE, Sept 1989.
- [McNE 85] McNEILL, D., So you think gesture are nonverbal ?, *Psychological Review*, 92, p. 350-371, 1985.
- [McNE 87] McNEILL, D., So you do think gesture are nonverbal ! Reply to Feyereisen (1987), *Psychological Review*, 94, 499-504, 1987.

Article reçu le 15 avril 1993, version révisée le 30 septembre 1993.

Rédacteur responsable : Jocelyne Nanard.



Claude Cadoz est directeur et fondateur, avec Annie Luciani et Jean-Loup Florens avec qui il collabore depuis 1975, de l'ACROE, centre de recherche du ministère de la Culture, associé au LIFIA, Laboratoire d'Informatique Fondamentale et d'intelligence artificielle, de l'IMAG (Informatique et mathématiques appliquées de Grenoble). L'ACROE mène des travaux sur l'application de l'informatique à la création artistique dans deux domaines : la musique et l'image animée. Claude Cadoz est co-inventeur du clavier rétroactif modulaire, dispositif pour l'interaction gestuelle avec retour d'effort. Il a développé également, avec J.-L. Florens et A. Luciani, un système de modélisation et de simulation d'objets physiques par ordinateur, le système CORDIS-ANIMA. Il est auteur de nombreux articles sur l'informatique musicale, la synthèse du son par modèles physiques, le rôle du geste dans la communication homme-machine.